Jurnal Pengelolaan Sumberdaya Alam dan Lingkungan
Vol. 6 No. 1 (Juli 2016): 13-19
e-ISSN: 2460-5824

Available online at:
http://journal.ipb.ac.id/index.php/jpsl/
doi : 10.19081/jpsl.6.1.13

BIOREMEDIASI TANAH BERTEKSTUR KLEI TERKONTAMINASI MINYAK BUMI: APLIKASI TEKNIK *BIOPILE* DENGAN PENAMBAHAN PASIR

Bioremediation of a Clay Textured Soil Contaminated with Crude Oil: Application of Biopile Technique with Addition of Sand

Arifudin[a], Mohamad Yani[b], Kukuh Murtilaksono[c]

[a] Program Studi Pengelolaan Sumberdaya Alam dan Lingkungan (PSL), Sekolah Pascasarjana Institut Pertanian Bogor —arifudinbtl08@gmail.com
[b] Departemen Teknologi Industri Pertanian, Fakultas Teknologi Pertanian, Institut Pertanian Bogor, Kampus IPB Darmaga.
[c] Departemen Ilmu Tanah dan Sumberdaya Lahan, Fakultas Pertanian, Institut Pertanian Bogor Departemen, Kampus IPB Darmaga.

Abstract. *Problem encountered in the application of biopile technique for bioremediation of clay textured soils contaminated with crude oil is limited rate of air flow through the soil. It is a challenge to solve the problem by adding the soil with sand. The addition of sand is also indispensable for the well growth and activity of bacteria in the bioremediation process. This study aims to evaluate the addition of sand on bioremediation of a clay textured soil contaminated with crude oil using biopile technique at pilot scale of 2 tons capacity. The results showed a decline of 76% soil TPH concentration, from 4.22% to 1.00%, within 63 days. Total population of bacteria during the bioremediation process ranged from 1.00 x10^6 to 1.43 x 10^{11} CFUs.g^{-1} soil. At the end of the experiment, a loss in the types and content of some easily degrading hydrocarbon substances was observed.*

Keywords: *biopile, bioremediation, clay, crude oil, sand.*

(Diterima: 15-11-2015; Disetujui: 15-12-2015)

1. Pendahuluan

Selain meningkatkan perekonomian dan devisa negara, penambangan minyak bumi juga membawa risiko pencemaran lingkungan. Kontaminasi tanah oleh minyak bumi merupakan hal yang sering terjadi pada aktivitas industri perminyakan (Priyanto 2012). Di penambangan minyak yang dikelola masyarakat, pengelolaan lingkungan tidak dilaksanakan dengan baik. Limpasan air formasi hasil pengeboran dibiarkan masuk ke badan sungai. Kegiatan penyulingan secara tradisional juga menyebabkan terjadinya ceceran dan tumpahan minyak. Untuk mengatasi permasalahan ini, terutama di lingkungan sumur minyak tua yang keekonomiannya relatif rendah, maka diperlukan teknik remediasi yang layak untuk diterapkan.

Biopile merupakan salah satu teknik bioremediasi tanah tercemar minyak bumi dengan biaya pengolahan relatif rendah dan ramah lingkungan. Kelebihan lain teknik *biopile* diantaranya adalah tidak memerlukan lahan yang luas. Kondisi kelembaban dan ketersediaan udara dalam *biopile* juga dapat dikendalikan, sehingga pertumbuhan dan aktivitas bakteri agen bioremediasi dapat terjaga.

Biopile memerlukan pasokan oksigen dari atmosfir maupun *blower*. Oksigen digunakan bakteri dalam proses metabolisme hidrokarbon. Distribusi oksigen di dalam *biopile* akan terhambat bila tanah yang diolah bertekstur klei. Menurut Vidali (2001), pada kondisi kelembaban tinggi seperti dalam *biopile*, tanah bertekstur klei sulit mengalirkan udara sehingga distribusi nutrisi dalam tanah tidak merata dan berdampak pada pertumbuhan dan aktivitas bakteri pendegradasi (Charlena *et al*. 2010).

Pada kondisi lembab, pori tanah terisi oleh udara dan air dengan perbandingan yang tergantung pada tekstur tanah. Penambahan pasir dapat meningkatkan porositas dan aerasi tanah. Untuk meningkatkan kegemburan dan kemampuan tanah dalam menahan air dapat ditambahkan kompos. Penelitian ini bertujuan mengevaluasi bioremediasi tanah bertekstur klei yang terkontaminasi minyak bumi menggunakan teknik *biopile* dengan penambahan pasir pada skala *pilot* berkapasitas 2 ton.

2. Metode Penelitian

2.1. Bahan

Pada penelitian ini tanah terkontaminasi minyak bumi dipersiapkan dengan pencampuran secara merata tanah Latosol, pasir komersil dan kompos komersil

dengan nisbah 60:30:10 serta 5% b/b minyak bumi. Minyak bumi diperoleh dari penambangan yang dikelola masyarakat di Desa Wonocolo, Bojonegoro, Jawa Timur. *Bulk sample* tanah pada kedalaman 15-80 cm diambil dari lahan kosong di sekitar Gedung 412 Balai Teknologi Lingkungan, Kawasan Puspiptek, Tangerang Selatan, Banten. Sebelum pencampuran, tanah dikering-udarakan selama tiga minggu di dalam rumah kaca dan diayak dengan lubang ayakan berdiameter 2 mm.

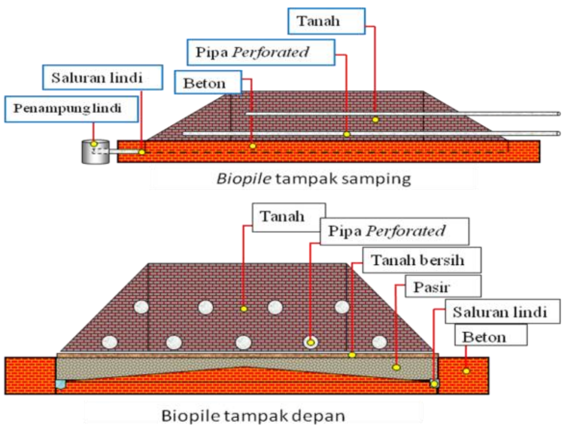
Dalam penelitian ini digunakan pupuk Urea dan NPK komersil dengan nisbah C:N:P = 100:5:1 (Zam 2010). Konsorsium bakteri yang digunakan berasal dari koleksi Balai Teknologi Lingkungan hasil isolasi dari tanah tercemar minyak di daerah Cepu, Jawa Tengah, yaitu isolat KBTL1, KBTL2 dan KBTL3.

2.2. Alat

Alat yang digunakan meliputi *blower* kapasitas 60 L/menit, *flowmeter, soil tester, moisture meter* dan GC seri 5977A Agilent dengan Detektor MS dan suhu 325 ^{o}C. Kolom GC yang digunakan adalah *Phenyl Methyl Silox* (30 m x 250 µm x 0.25 µm) dengan tekanan 7.0699 psi dan aliran kolom 1 L/menit.

2.3. Desain Biopile Kapasitas 2 ton

Biopile skala pilot kapasitas 2 ton yang dioperasikan berdimensi PxLxT = 2.65 m x 2 m x 0.8 m dengan kemiringan 50 derajat. *Biopile* diletakkan di lahan terbuka di atas lapisan beton dan diberi atap sebagai pelindung angin dan hujan (Kratzke *et al*. 1998). Lapisan beton berfungsi untuk mencegah penyebaran lindi ke dalam tanah. Lindi yang terbentuk dialirkan ke dalam bak penampungan (Gambar 1). *Biopile* diintregasikan dengan sistem aerasi bersumber udara utama dari *blower*.



Gambar 1. Desain kontruksi biopile kapasitas 2 ton

Sistem aerasi terdiri atas pipa *perforated*, pipa *manifold*, *flowmeter* dan *blower*. Pipa *perforated* yang digunakan memiliki panjang 1.05 m dan diameter 1.27 cm. Untuk mengalirkan udara, bagian sisi pipa pada posisi jam 4 dan 8 diberi lubang aerasi atau *hole* berdiameter 0.30 cm dengan jarak antar lubang 7.62 cm. Hal ini untuk menghindari masuknya partikel tanah maupun material lainnya ke dalam pipa *perforated*. Lalu pipa *perforated* dibalut dengan ijuk atau sabut kelapa.

Pada setiap *biopile* dipasang masing-masing lima dan empat pipa *perforated* di bagian bawah dan tengah atau pada ketinggian 40 cm. Pada setiap pipa *perforated* diberi keran untuk mengatur aliran udara. Pipa *perforated* dihubungkan dengan pipa *manifold*. Pipa *manifold* dihubungkan dengan *blower* kapasitas 60 L/menit.

2.4. Start-up Bioremediasi dengan Teknik Biopile

Penempatan tanah terkontaminasi ke dalam emplasemen bioremediasi dilakukan dengan cara manual menggunakan cangkul. Sebagai lapisan pertama digunakan tanah bersih dengan ketebalan 15 cm. Lalu di atas lapisan tanah bersih dipasang pipa *perforated* tahap pertama, ditutup dengan sabut kelapa dan kerikil untuk menghindari masuknya partikel tanah ke dalam *hole*. Selanjutnya tanah terkontaminasi yang sudah dicampur dengan pupuk Urea dan NPK ditempatkan di emplasemen hingga ketebalan 40 cm. Di permukaan lapisan tanah tersebut kemudian dipasang pipa *perforated* tahap kedua serta ditutup lagi dengan sabut kelapa dan kerikil. Selanjutnya ditempatkan tanah terkontaminasi tahap kedua hingga ketebalan 40 cm, sehingga tinggi keseluruhan *pile* adalah 80 cm. Pada tahap terakhir pipa *perforated* dihubungkan dengan pipa *manifold* yang telah terhubung dengan *blower*.

2.5. Parameter Pengamatan

Parameter fisika tanah dalam *pile* yang diamati adalah suhu yang diukur menggunakan termometer, kadar air menurut metode gravimetri (ASTM D2216), bobot jenis partikel dan bobot isi menurut metode perendaman dalam piknometer dan gravimetri (Black dan Hartge 1986), serta distribusi ukuran pori menurt metode *Pressure Plate Apparatus* (Danielson dan Sutherland 1986). Parameter kimia tanah yang diamati adalah pH yang diukur menurut metode elektrometri (ASTM D4972-01), tekstur menurut metode pipet (Gee dan Bauder 1986), C-organik menurut ASTM D 2974-87, N-total dengan metode Kjeldahl (USEPA Method 351.3), P tersedia dengan metode Olsen (Olsen *et al*. 1954), produksi gas CO_2 dengan metode titrimetri (Eaton *et al*. 2005), gas NH_3 dengan metode indofenol (SNI 19-7119.1-2005), serta TPH dengan metode gravimetri (USEPA Method 1664), sedangkan TPC yang merupakan parameter biologi diukur dengan metode tuang (Cappucino dan Sherman 1987).

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Karakteristik Tanah Biopile

Tekstur tanah merupakan salah satu faktor penentu keberhasilan proses bioremediasi. Tekstur tanah menunjukkan perbandingan kadar fraksi pasir (diameter 2-0.05 mm), debu (0.05-0.02 mm) dan klei (<0.002 mm). Tanah dengan tekstur klei sulit mengalirkan udara dan karenanya distribusi nutrisi menjadi tidak merata. Berdasarkan diagram segitiga tekstur tanah, matrik tanah *biopile* termasuk ke dalam kelas tekstur lempung berklei. Tanah didominasi oleh fraksi klei (39%), diikuti fraksi pasir (31%) dan sisanya fraksi debu (30%) (Tabel 1). Komposisi fraksi pasir yang berimbang dengan fraksi klei menyebabkan tanah lebih *porous* dan remah. Hal ini dibuktikan dengan rendahnya nilai bobot isi tanah, yaitu 0.84 g/cc. Bobot isi merupakan perbandingan bobot tanah kering mutlak dengan volume tanah termasuk volume pori. Rendahnya bobot isi mengindikasikan bahwa tanah *biopile* tidak padat sehingga mudah mengalirkan udara dan air. Menurut Nugroho (2009), tanah dengan bobot isi rendah memiliki ketersedian oksigen lebih banyak dibandingkan tanah dengan bobot isi tinggi. Pada umumnya tanah klei, lempung berklei, dan lempung berdebu memiliki bobot isi antara 1-1.6 g/cc. Bobot isi tanah berpasir berkisar 1.2-1.8 g/cc (Brady 1984).

Tabel 1. Sifat fisik matrik tanah terkontaminasi minyak bumi

Sifat Fisika Tanah	Kadar
Porisitas (%)	54.5
Bobot isi (g/cc)	0.84
Bobot jenis partikel (g/cc)	1.84
Pori drainase cepat (%)	15.9
Pori drainase lambat (%)	4.4
Air tersedia (%)	12.5
Kadar air (%)	36.2
Tekstur:	
- Klei (%)	39
- Debu (%)	30
- Pasir (%)	31

Tanah dengan kadar bahan organik lebih tinggi lebih mampu dan lama dalam menahan air dibanding-kan tanah berkadar bahan organik rendah seperti tanah berpasir. Proses bioremediasi berlangsung dengan lebih baik pada tanah yang mampu menahan air lebih lama namun tidak menghambat pergerakan dan pertu-karan gas antara tanah dan atmosfir, sehingga pertum-buhan bakteri pendegradasi minyak tetap terjaga (Rachman *et al*. 2013). Tabel 1 memperlihatkan bah-wa matrik tanah memiliki kemampuan menahan air dalam kategori sedang. Hal ini ditunjukkan oleh volu-me air tersedia yang mencapai 12.5%. Air tersedia merupakan selisih kadar air tanah pada pF 2.54 (kapasitas lapang) dan pF 4.2 atau air kapiler yang dapat dimanfaatkan oleh tumbuhan maupun mikrob seperti bakteri tanah pendegradasi minyak.

Pada tanah jenuh air, semua pori tanah baik pori makro maupun mikro terisi air. Pada tanah lembab, pori tanah terisi udara dan air dengan perbandingan tertentu. Pada tanah berpasir, jumlah pori mikro lebih banyak dibandingkan pada tanah klei. Data analisis memperlihatkan bahwa matrik tanah memiliki nilai porositas 54.5% dan pori drainase cepat 15.9% atau termasuk dalam kategori sedang. Nilai pori drainase cepat ini mengindikasikan bahwa air gravitasi dalam tanah dengan cepat terlindikan setelah pemberian air terhenti. Dengan demikian rongga udara yang tidak terisi air diisi oleh udara. Karena oksigen tanah dikonsumsi bakteri secara terus menerus, maka oksigen di dalam tanah perlu diisi ulang. Kondisi tanah yang remah menjadikannya mudah dialiri udara dari *blower* maupun atmosfir. Menurut Hwang *et al.* (2006), untuk menjaga biodegradasi tetap berlangsung setidaknya harus tersedia 2-5% oksigen di dalam tanah.

3.2. Perubahan pH Tanah

Biodegradasi hidrokarbon dipengaruhi oleh pH media. Tanah dengan pH rendah (asam) atau tinggi (basa) menghambat pertumbuhan bakteri. Menurut Dhote *et al*. (2009), nilai pH tanah juga dapat mengendalikan aktivitas enzim, transportasi dan kelarutan hara. Hasil pengamatan selama proses bioremediasi menunjukkan bahwa pH tanah termasuk dalam kategori netral yaitu antara pH 7.25-7.37 (Gambar 2a) sehingga baik untuk pertumbuhan bakteri. Menurut Sharma (2012), pH tanah optimal bagi pertumbuhan bakteri adalah 6.5-8 dengan rentang pH 5.5-8.5. Menurut USEPA (2004), pH tanah optimal untuk pertumbuhan bakteri adalah pada kisaran 6-8. Di luar kisaran pH tersebut perlu dilakukan penyesuaian dengan penambahan kapur bila pH tanah masam, atau penambahan asam seperti amonium sulfat bila pH tanah basa.

3.3. Pertumbuhan Bakteri

Hasil pengukuran pertumbuhan bakteri selama proses bioremediasi disajikan pada Gambar 2b. Pada hari ke-1 pertumbuhan bakteri mengalami peningkatan 19.4% dibandingkan hari ke-0 karena bakteri mulai beradaptasi dengan lingkungan dan tumbuh dengan memanfaatkan senyawa hidrokarbon dalam tanah sebagai sumber energi. Pada hari ke-7 pertumbuhan bakteri meningkat dengan cepat yaitu sebesar 31.2% dibandingkan hari ke-1. Peningkatan ini sejalan dengan meningkatnya produksi gas CO_2 pada kurun waktu yang sama hingga mencapai 91.25 mg/m^3.

Pada hari ke-14 pertumbuhan bakteri mengalami penurunan 2.3%. Penurunan ini disebabkan oleh menurunnya kadar air hingga 18.58%. Untuk meningkatkan pertumbuhan bakteri, ke dalam tanah ditambahkan sejumlah air hingga kadar air mencapai 27%. Setelah penambahan air, populasi bakteri mengalami

peningkatan menjadi 1.36 x 10^{11} CFUs/g. Namun pada minggu-minggu berikutnya, ketika senyawa hidrokarbon mulai berkurang, pertumbuhan bakteri melambat dan selanjutnya menurun.

3.4. Perubahan Suhu Tanah

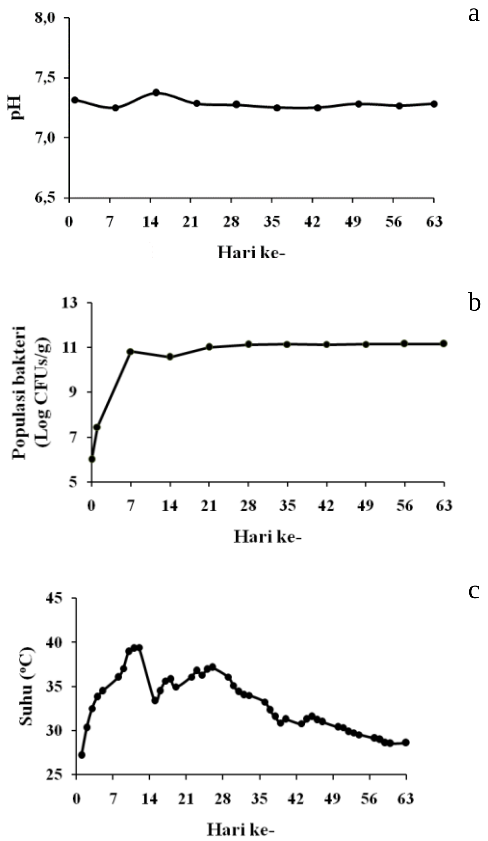
Pengukuran suhu dilakukan pada enam titik, empat titik pada masing-masing sisi *biopile* dan masing-masing satu titik pada bagian atas dan pusat *biopile* pada kedalaman 40 cm. Hasil pengukuran (Gambar 2c dan 3) menunjukkan suhu tertinggi terukur di bagian pusat *biopile*. Li *et al*. (2004) menerangkan bahwa suhu pada pusat tumpukan lebih tinggi dibandingkan dengan bagian lain.

Pada hari ke-1 suhu rata-rata tanah *biopile* masih rendah dan hampir sama dengan suhu ruang, yaitu 27.21°C. Pada hari berikutnya suhu tanah mengalami peningkatan dengan suhu tertinggi terjadi pada hari ke-12, yaitu 39.42 °C. Menurut Das dan Chandran (2011), suhu optimal untuk mendegradasi senyawa hidrokarbon adalah 30-40 °C. Juhasz *et al*. (2005) melaporkan bahwa laju optimal degradasi hidrokarbon pada bioremediasi minyak bumi skala pilot dengan teknik *biopile* terjadi pada suhu 39.1-50 °C. Sopiah dan Arifudin (2012) melaporkan bahwa suhu optimal untuk degradasi hidrokarbon pada bioremediasi tanah tercemar minyak dengan teknik *landfarming* adalah 45 °C. Meningkatnya suhu menandakan bahwa proses degradasi minyak bumi sedang berjalan karena bakteri pendegradasi menggunakan senyawa hidrokarbon untuk proses metabolisme dan menghasilkan energi termal.

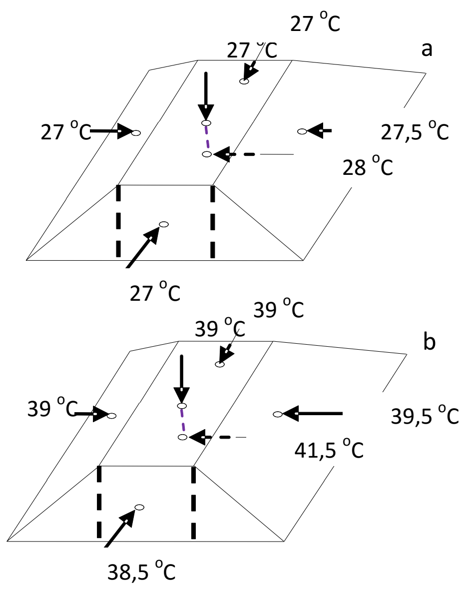
Pada hari ke-14 suhu tanah mengalami penurunan 15% dari 39.42 °C menjadi 33.38 °C. Penurunan suhu ini disebabkan oleh terjadinya penurunan kadar air tanah *biopile* hingga mencapai 17.07% dari 22.40% menjadi 18.58%. Hal ini menyebabkan pertumbuhan bakteri pendegradasi minyak menurun hingga populasinya menjadi 3.7 x 10^{10} CFUs/g dari sebelumnya 6.6 x 10^{10} CFUs/g. Cuaca yang panas pada siang hari dengan kisaran suhu mencapai 35-36 °C menyebabkan air mudah menguap dan tanah menjadi kering, terutama di lapisan permukaan *biopile*. Menurut Kamnikar (1992), kelembaban tanah akan berkurang selama proses bioremediasi berlangsung. Sebagai gambaran, kelembaban tanah berkurang 1-2% selama 3 bulan proses bioremediasi dalam keadaan tertutup. Untuk menjaga kelembaban tanah, setiap hari kerja dilakukan penyemprotan air di permukaan *biopile*. Suhu pada minggu ke-3 mengalami peningkatan hingga mencapai 37.17 °C. Peningkatan suhu ini tidak lebih besar dibandingkan pada minggu ke-2. Hal ini menunjukkan bahwa senyawa hidrokarbon yang dapat didegradasi jumlahnya mulai berkurang karena telah dikonsumsi bakteri untuk pertumbuhannya. Pada minggu-minggu berikutnya, suhu tanah mengalami penurunan hingga mencapai suhu ruang.

3.5. Perubahan Gas NH_3

Produksi gas NH_3 selama proses bioremediasi disajikan pada Gambar 4a. Terbentuknya gas NH_3 menunjukkan terjadinya reaksi anaerobik. Walaupun penelitian ini dirancang untuk berlangsung secara aerobik, yaitu dengan dialiri udara yang berasal dari *blower*, akan tetapi gas NH_3 terdeteksi. Menurut Charlena (2010), gas NH_3 terbentuk sebagai akibat terjadinya biodegradasi senyawa hidrokarbon yang mengandung N yang berlangsung secara anaerobik. Hasil analisis memperlihatkan bahwa gas NH_3 yang dihasilkan bersifat fluktuatif.



Gambar 2. Hasil analisis parameter kimia, biologi dan fisika selama proses bioremediasi; a: pH, b: populasi bakteri, c: suhu



Gambar 3. Profil suhu dalam biopile; a: pada hari ke-1, b: pada hari ke-12

Pada hari ke-1 dan ke-14 belum dihasilkan gas NH_3. Setelah hari ke-28 mulai dihasilkan gas NH_3 21.75 µg/m^3. Hal ini mengindikasikan bahwa di dalam *biopile* terjadi proses perombakan senyawa hidrokarbon oleh bakteri anaerobik menjadi gas NH_3. Terjadinya kondisi anerobik ini dapat disebabkan oleh adanya bagian tanah di dalam *biopile* yang tidak dilewati udara akibat terjadinya pemadatan. Menurut Jorgensen *et al*. (2000), kondisi anaerobik menghambat aktivitas bakteri aerob dan meningkatkan aktivitas bakteri anaerob sehinga terbentuk gas NH_3.

Pemadatan tanah mungkin terjadi pada bagian dasar *biopile*, namun tidak terjadi pada bagian tengah dan permukaan. Dari hasil analisis contoh tanah yang diambil pada kedalaman 30 cm diperoleh bobot isi 0.84 g/cc dan porositas 54.5%. Rendahnya bobot isi dan tingginya porositas tanah mengindikasikan bahwa tanah di dalam *biopile* pada kedalaman tersebut tidak padat atau *porous* sehingga mudah dialiri udara. Dengan demikian walaupun di dalam *biopile* terjadi proses anaerobik namun secara umum proses bioremediasi masih berlangsung secara aerobik. Hal ini dibuktikan dengan produksi total gas NH_3 selama proses bioremediasi hanya 58.45 µg/m^3.

3.6. Perubahan Gas CO_2

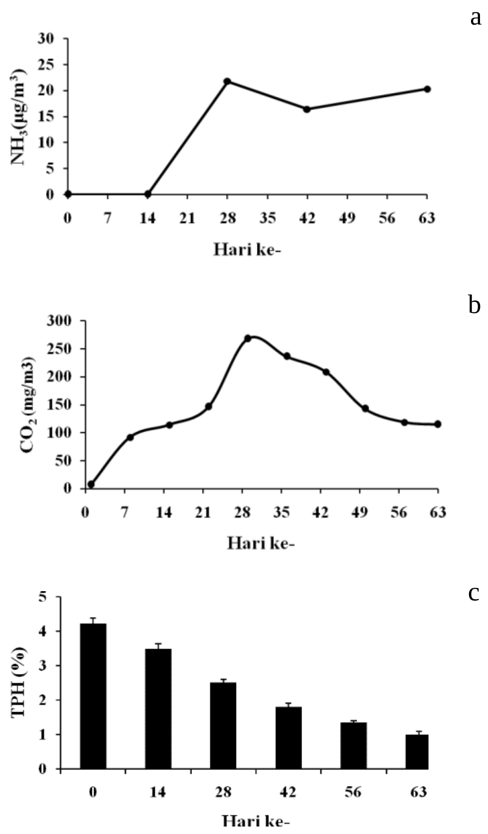
Aktivitas bakteri aerob dalam mendegradasi hidrokarbon pada proses bioremediasi menghasilkan senyawa yang lebih sederhana seperti gas CO_2 dan air. Berdasarkan penelitian Baptista *et al*. (2005), untuk meningkatkan produksi gas CO_2 perlu adanya stimulus yaitu dengan menambahkan nutrisi (Chokshi dan Nelson 2003).

Produksi gas CO_2 selama proses bioremediasi disajikan pada Gambar 4b. Pada hari ke-1 produksi gas CO_2 masih rendah yaitu 6.88%. Pada hari ke-7 produksi gas CO_2 mengalami peningkatan sebesar 92.5% dibandingkan hari ke-1. Puncak produksi gas CO_2 terjadi pada hari ke-28 yang mencapai 267.13 mg/m^3. Peningkatan produksi gas CO_2 ini diikuti oleh menurunnya TPH di dalam tanah. Pada hari ke-35 produksi gas CO_2 mulai menurun. Penurunan tertinggi sebesar 31.7% terjadi pada hari ke-42. Penurunan produksi gas CO_2 mengindikasikan penurunan degradasi minyak karena pada akhir bioremediasi umumnya yang tersisa adalah senyawa hidrokarbon yang sulit didegradasi oleh bakteri.

3.7. Perubahan TPH

Pada penelitian ini pengukuran kadar TPH dilakukan setiap dua minggu selama 8 minggu atau 63 hari. Kadar TPH (Gambar 4c) pada awal bioremediasi terukur 4.22%. Setelah dua minggu proses bioremediasi berlangsung terjadi penurunan TPH sebesar 17.28% dari 42227 ppm atau 4.22% menjadi 35436 ppm atau 3.54%. Penurunan TPH tertinggi terjadi pada minggu ke-4 yaitu sebesar 28.24% dari 35436 ppm atau 3.54% menjadi 25065 ppm atau 2.51%.

Pada minggu berikutnya laju degradasi mengalami pelambatan. Hal ini dikarenakan senyawa hidrokarbon yang tersisa sulit didegradasi oleh bakteri. Pada pengukuran TPH minggu ke-9 kadar TPH telah mencapai 1.00%. Hal ini menunjukkan bahwa hasil proses bioremediasi tanah bertekstur klei yang terkontaminasi minyak bumi menggunakan teknik *biopile* skala pilot kapasitas 2 ton dengan penambahan pasir telah memenuhi baku mutu yang ditetapkan dalam Keputusan Menteri LH No. 128 Tahun 2003 tentang “Tata Cara dan Persyaratan Teknis Pengolahan Limbah Minyak Bumi dan Tanah Terkontaminasi oleh Minyak Secara Biologis” (Kemen LH 2003).



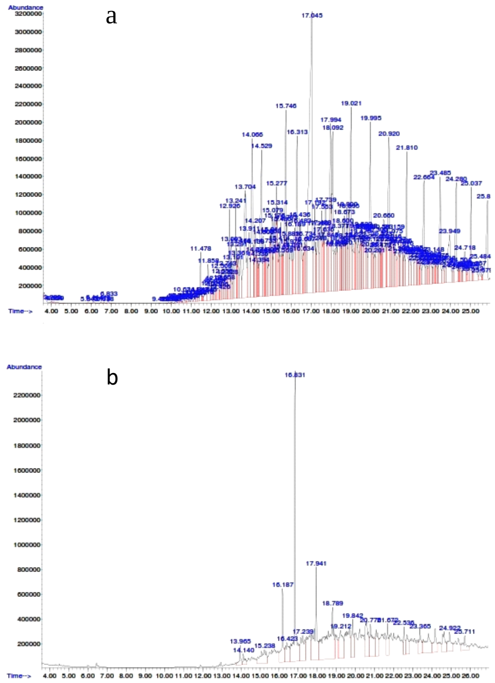
Gambar 4. Analisis parameter kimia selama proses bio-remediasi; a: gas NH_3, b: gas CO_2 dan c: TPH

3.8. Perubahan Senyawa Hidrokarbon

Analisis senyawa hidrokarbon dilakukan sebelum dan sesudah proses bioremediasi. Data kromatogram hasil analisis dengan GCMS menunjukkan perubahan komposisi jenis dan kadar senyawa hidrokarbon ber-dasarkan luas area yang terukur.

Kromatogram GCMS pada awal bioremediasi (Gambar 5a) menunjukkan banyak *peak* dengan luas area *peak* yang berbeda-beda. Hal ini menunjukkan bahwa pada awal bioremediasi tanah terkontaminasi minyak bumi mengandung berbagai jenis senyawa hi-drokarbon. Hasil interpretasi data menunjukkan bahwa di dalam tanah terkontaminasi minyak bumi terkan-dung senyawa hidrokarbon alkana berantai lurus mulai dari C12 sampai C27 dan senyawa alkana berantai bercabang seperti 2, 6 dimetil undekana, 2, 6, 10 trimetil dodekana, 2, 6, 10 trimetil pentadekana dan 2, 6, 10, 14 tetrametil pentadekana.

Senyawa alkana berantai lurus C10–C20 bersifat ku-rang meracun dan sebagian besar mudah dide-gradasi (Cookson 1995). Senyawa alkana berantai bercabang seperti senyawa 2, 6, 10, 14 tetrametil pentadekana atau biasa dikenal sebagai pristana relatif lebih sulit didegradasi oleh bakteri (Kuhlmeier 1994).



Gambar 5. Kromatogram GC-MS dari tanah terkontaminasi minyak; a: awal bioremediasi, b : akhir bioremediasi

Kromatogram pada akhir bioremediasi (Gambar 5b) memperlihatkan banyaknya senyawa hidrokarbon yang hilang. Hal ini ditunjukkan dengan berkurangnya jumlah *peak* yang dihasilkan. Disamping itu juga terlihat adanya penurunan kelimpahan atau *abudance*. Perubahan ini terjadi akibat adanya proses degradasi oleh bakteri menjadi senyawa yang lebih sederhana seperti gas CO_2. Berdasarkan interpretasi data, senyawa hidrokarbon yang teridentifikasi pada akhir bioremediasi adalah senyawa alkana rantai lurus seperti C16, C18, C20–C24 dan C26-C27, dan alkana rantai bercabang seperti 2, 6, 10 trimetil pentadekana dan 2, 6, 10, 14 tetrametil pentadekana.

Senyawa 2, 6, 10, 14 tetrametil pentadekana atau pristana merupakan senyawa hidrokarbon yang sulit didegradasi. Senyawa pristana dapat didegradasi mela-lui proses oksidasi subtermal (Cong *et al*. 2009). Proses tersebut terjadi secara aerobik dengan melibatkan oksigen sebagai akseptor elektron eksternal (Komarawidjaja dan Lysiastuti 2009). Enzim mono-oksigenase yang dihasilkan bakteri memiliki peran pada tahap awal lintasan dalam mengoksidasi 2,6,10,14 tetrametil pentadekana menjadi 2, 6, 10, 14 tetrametil pentadekana-3-ol. Dalam hal ini enzim menyerang rantai karbon ketiga dan menghasilkan alkohol sekunder. Selanjutnya senyawa 2, 6, 10, 14 tetrametil pentadekana-3-ol dioksidasi dan menghasil-kan 2, 6, 10, 14 tetrametil pentadekana-3-on. Pada akhir lintasan didapat senyawa 2-metil butanadioat (Cong *et al*. 2009).

4. Kesimpulan

Bioremediasi campuran tanah bertekstur klei, pasir, dan kompos dengan nisbah 60:30:10 yang dikontaminasi 5% b/b minyak bumi menggunakan teknik *biopile* skala pilot berkapasitas 2 ton menurunkan kadar TPH dari 42.2% menjadi 1.00% dalam waktu 63 hari.

Daftar Pustaka

[1] Baptista, S. J., M. C. Cammarota, Dias, 2005. Production of CO_2 in crude oil bioremediation in clay soil. Braz Arch Biol Technol. 48, pp. 249-255.

[2] Black, G. R., K. H. Hartge, 1986. Bulk Density and Particle Density. Methods of Soil Analysis. Part 1. Physical and Mineralogical Methods. 2nd Edition. American Society of Agronomy, Madison WI.

[3] Brady, N. C. 1984. The Nature and Properties of Soils. 9nd Edition. Macmillan, New York .

[4] Cappucino, J. G., N. Sherman, 1987. Microbiology: A Laboratory Manual. Benjamin Cummings, California.

[5] Charlena. 2010. Bioremediasi tanah tercemar limbah minyak berat menggunakan konsorsium bakteri . Disertasi. Institut Pertanian Bogor, Bogor.

[6] Charlena, Z. M. Alim, I. Anas, Y. Setiadi, M. Yani, 2010. Produksi gas karbon dioksida selama proses bioremediasi limbah *heavy oil* dengan teknik *landfarming*. Chem. Prog. 3(1), pp. 1-5.

[7] Chokshi, B. G., Y. M. Nelson, 2003. Optimization of high-strength hydrocarbon biodegradation using respirometry. Dalam: Magar VS, Kelley ME, editor. *In Situ and On-Site Bioremediation.* Proc. Seventh Intern In Situ and On-Site Bioremediation Symp. pp. 1-10. Battle Pr, Orlando.

[8] Cookson, J. T., 1995. Bioremediation Engineering: Design and Aplication. McGraw-Hill, New York.

[9] Cong, L. T. N., A. Mikolasch, H. P. Klenk, F. Schauer, 2009. Degradation of the multiple branched alkane 2,6,10,14-tetramethyl-pentadecane (pristane) in *rhodococcus ruber* and *mycobacterium neoaurum*. Intern Biodeterioration & Biodegradation. 63, PP. 201–207.

[10] Danielson, R.E., P. L. Sutherland, 1986. Pore Size Distribution. Methods of Soil Analysis. Part 1. Physical and Mineralogical Methods. 2nd Edition. American Society of Agronomy, Madison WI.

[11] Das, N., P. Chandran, 2011. Microbial degradation of petroleum hydrocarbon contaminants: an overview. Biotech Res Intern. 2(1), PP 1-13. doi:10.4061/2011/941810.

[12] Dhote, M., A. Juwarkar, A. Kumar, G.S. Kanade, T. Chakrabarti, 2009. Biodegradation of chrysene by the bacterial strains isolated from oily sludge. World J Microbiol Biotechnol. 26(2), pp. 29–335.

[13] Eaton, A. D., L. S. Aesceri, E. W. Rice, A. E. Greenberg, 2005. Standar Methods for the Examination of Water and Wastewater. American Public Health Association, Washington DC.

[14] Gee, G. W, J. W. Bauder, 1986. Particle Size Analysis. Methods of Soil Analysis. Part 1. Physical and Mineralogical Methods. 2nd Edition. American Society of Agronomy, Madison WI.

[15] Hwang, E. Y., J. S. Park, J. D. Kim, W. Namkoong, 2006. Effects of aeration mode on the composting of diesel contaminated soil. J Ind Eng Chem. 12 (5), pp. 694-701.

[16] Jorgensen, K. S., J. Puustinen, A. M. Sourtti, 2000. Bioremediation of petroleum hydrocarbon-contam-inated soil by composting in biopiles. Env Poll. 107, pp. 245-254.

[17] Juhasz, A.L., N. Waller, C. Lease, R. Bentham R. Stewart, 2005. Pilot scale bioremediation of creosote-contaminated soil-efficacy of enhanced natural attenuation and bioaugmentation strategies. Biorem J. 9 (3-4), pp. 141-157. doi: 10.1080/10889860 600572772.

[18] Kamnikar, B. 1992. Bioremediation of contaminated soil. Poll Eng. 24(21), pp. 50-52.

[19] [Kemen LH] Kementrian Negara Lingkungan Hidup, 2003. Keputusan Menteri Lingkungan Hidup No 128 tahun 2003 Tentang Tatacara dan Persyaratan Teknis Pengolahan Limbah Minyak Bumi dan Tanah Terkontaminasi Limbah Minyak Bumi Secara Biologis. Kementrian Negara Lingkungan Hidup, Jakarta.

[20] Komarawidjaja, W., E. Lysiastuti, 2009. status konsorsium mikroba lokal pendegradasi minyak. J Teknol Lingk. 10(3), pp. 347-354.

[21] Kratzke, R., W. Major, F.V. Fahnestock, G. Wickramanayake, 1998. Biopile Design, Operation and Maintenance Handbook for Treating Hydrocarbon Contaminated Soils. Battelle Pr, Ohio.

[22] Kuhlmeier, P. D., 1994. Biodegradation of Organic Pol-lutants in Soil. In: DL Wise, DJ Trantolo, editor. *Process Engineering for Pollution Control and Waste Minimization.* Marcel Dekker, New York .

[23] Li, L., C.J. Cunningham, V. Pas, J.C. Philp, D. A. Barry, P. Anderson, 2004. Field trial of a new aeration system for enhancing biodegradation in a biopile. Waste Manag. 24, pp. 17-137.

[24] Nugroho, Y. 2009. Analisis sifat fisik-kimia dan kesuburan tanah pada lokasi rencana hutan tanaman industri pt prima multibuana. Hutan Tropis Borneo 10 (27), pp 222-229.

[25] Olsen, S.R., C.V. Cole, F.S. Watanabe, L.A. Dean, 1954. Estimation of Available P in Soils by Extraction with Sodium Bicarbonate. USDA Cir. No 939.

[26] Priyanto, B. 2012. Toleransi lima jenis rumput terhadap minyak dan kapasitas degradasinya dalam sistem fitoremediasi. J Teknol Lingk. 13 (2), pp. 141-149.

[27] Rachman, L. M, E. D. Wahjunie, K.R. Brata, W. Purwakusuma, K. Murtilaksono, 2013. Fisika Tanah Dasar. DITSL-IPB, Bogor.

[28] Sharma, S. 2012. Bioremediation: features, strategies and applications. Asian J of Pharm Life Sci. 2 (2), pp. 202-21.

[29] Sopiah, N., Arifudin, 2012. Uji coba kinerja bakteri karbonoklastik pada tanah tercemar minyak bumi dengan teknik *landfarming*. J Teknol Lingk. 13 (2), pp. 131-140.

[30] [USEPA] United States Environmental Protection Agency. 2004. Chapter IV (Biopile) of OUST's publication: How to Evaluate Alternative Cleanup Technologies for Underground Storage Tank Sites: A Guide for Corrective Action Plan Reviewers, USEPA, Washington DC.

[31] Vidali, M. 2001. Bioremediation. an overview. Pure Applied Chem. 73 (7) pp. 63-172.

[32] Zam, S. I., 2010. Optimasi konsentrasi inokulum, rasio c:n:p dan ph pada proses bioremediasi limbah pengilangan minyak bumi menggunakan kultur campuran. El-Hayah 1 (2), pp. 23-34.